助剂对棉蚜新型防治药剂的减施增效作用*

于 丽[1, 2**] 安静杰[1**] 高占林[1] 郭江龙[1] 门兴元[3] 宋莹莹[3]
安 琳[1, 2] 党志红[1] 李耀发[1***] 唐博文[2***]

（1. 河北省农林科学院植物保护研究所，国家植保微生物种质资源库（河北），
河北省农业有害生物综合防治技术创新中心，河北省作物有害生物综合防治国际科技联合研究中心，
保定 071000；2. 河北农业大学植物保护学院，保定 071001；3. 山东省农林科学院植物保护研究所，济南 250100）

摘 要 **【目的】** 为了研究添加增效助剂对新型杀虫剂防控棉蚜 *Aphis gossypii* 田间效果的影响，明确其减施增效作用。**【方法】** 采用叶片浸渍法测定了增效剂和新型杀虫剂混用对棉蚜室内生物活性的影响，测定了表面张力、接触角、持留量等指标，分析增效剂对药剂物理性状的影响，并采用茎叶喷雾法进行田间药效验证。**【结果】** 室内试验表明，6 种增效剂分别与 4 种杀虫剂混配均表现一定的增效作用，对氟吡呋喃酮、溴虫氟苯双酰胺、三氟苯嘧啶和双丙环虫酯的增效比分别为 6.35-274.36、3.00-26.40、2.69-17.57 和 1.01-11.37。物理性状研究表明，6 种增效剂分别降低了药液在棉花叶片 1.76%-38.56%表面张力及 0.16%-15.79%接触角；不同增效剂对药剂在叶片表面持留量影响存在差异。田间试验结果显示，中保云纹清与双丙环虫酯混配防效和持久性最佳，药后 14 d 防效高达 99.68%；青皮桔油、中保云纹青和金诺对三氟苯嘧啶药后 7 d 防效提升 29.18%-69.01%；橙皮精油和中保云纹青对溴虫氟苯双酰胺防效分别提升 32.57%-47.69%和 35.20%-47.40%；青皮桔油、中保云纹青和乐透可提升氟吡呋喃酮防效 1.62%-12.86%。**【结论】** 50 g/L 双丙环虫酯可分散液剂（减量 30%）与中保云纹青混用对棉蚜防治效果最佳，17%氟吡呋喃酮可溶性液剂（减量 30%）与乐透混用次之，研究结果为棉蚜绿色防控及药剂科学施用提供了理论依据和技术参考。

关键词 棉蚜；双丙环虫酯；增效剂；减施增效；防治效果

The benefits of adding synergists to insecticides for controlling of *Aphis gossypii*

YU Li[1, 2**] AN Jing-Jie[1**] GAO Zhan-Lin[1] GUO Jiang-Long[1] MENG Xing-Yuan[3]
SONG Ying-Ying[3] AN Lin[1, 2] DANG Zhi-Hong[1] LI Yao-Fa[1***] TANG Bo-Wen[2***]

(1. International Science and Technology Joint Research Center on IPM of Hebei Province, IPM Innovation Center of Hebei Province, National Collection of Plant-associated Microbes (Hebei), Plant Protection Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Baoding 071000, China; 2. Plant Protection College, Hebei Agriculture University, Baoding 071001, China; 3.Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100)

Abstract **[Aim]** To determine the benefits of adding synergists to four novel insecticides to control *Aphis gossypii*; specifically, to clarify if these reduce the amount of insecticide used and improve the effectiveness of control. **[Methods]** The leaf-dip method was used to evaluate the effects of synergists on the toxicity of novel insecticides to *A. gossypii*. Surface tension, contact angle, and retention, were measured to analyze the effects of synergists on the physicochemical properties of each insecticide. Field efficacy was further evaluated using the stem-leaf spray method. **[Results]** All six synergists showed varying degrees of synergy with the four insecticides tested. Synergistic ratios ranged from 6.35-274.36 for flupyradifurone,

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划项目（2022YFD1400904）；河北省自然科学基金（C2025301010）；河北省现代农业产业体系建设专项资金（HBCT2024100201）；河北省农林科学院基本科研业务费项目（2024120205）

**共同第一作者 Co-first authors，E-mail：yuli19990322@126.com；anjingjie147@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：liyaofa@126.com；tangbowen1992@163.com

收稿日期 Received：2025-07-08；接受日期 Accepted：2025-09-15

3.00-26.40 for broflanilide, 2.69-17.57 for triflumezopyrim, and 1.01-11.37 for afidopyropen. Physicochemical analyses revealed reductions in surface tension (1.76%-38.56%) and contact angle (0.16%-15.79%), with synergists differing in their effects on solution retention. Field trials confirmed significant improvements: The combination of Zhongbao Yunwenqing and afidopyropen had the best efficacy and persistence, with a control rate of up to 99.68% after 14 days. Green tangerine peel oil, Zhongbao Yunwenqing, and Jinnuo improved the effectiveness of spraying triflumezopyrim by 29.18%-69.01%. Green tangerine peel oil and Zhongbao Yunwenqing improved the effectiveness of broflanilide by 32.57%-47.69% and 35.20-47.40%, respectively. Green tangerine peel oil, Zhongbao Yunwenqing, and Letou improved the effectiveness of flupyradifurone by 1.62%-12.86%. **[Conclusion]** The combination of 50 g/L afidopyropen DC (reduced by 30%) with Zhongbao Yunwenqing was the best in terms of control, followed by 17% flupyradifurone SL (reduced by 30%) and Letou. These results offer a theoretical basis and practical guidance for the environmentally friendly, and rational, use of insecticides to control of *A. gossypii*.

Key words *Aphis gossypii*; afidopyropen; synergist; reducing application and increasing efficiency; control efficiency

棉蚜 *Aphis gossypii* 隶属半翅目蚜科，是棉花上常见的害虫，世界性分布，其寄主植物还包括石榴、木槿、黄瓜、辣椒等 300 余种作物（Fan *et al.*，2018）。棉蚜危害方式多样，既可通过刺吸植株汁液对农作物造成直接危害，又能分泌蜜露、传播病毒给寄主植物造成间接伤害（Zhong *et al.*，2022）。目前，化学杀虫剂仍是棉蚜防治的主要手段，由于棉蚜孤雌生殖、生殖周期短及频繁使用化学药剂导致其抗药性迅速增强（李越等，2023）。棉蚜已对有机磷类、拟除虫菊酯类、氨基甲酸酯类及新烟碱类等常规药剂普遍产生抗性，致使田间防治效果显著下降（安静杰等，2018；帕提玛·乌木尔汗等，2019；张帅，2021）。

新型药剂的研发与利用是害虫抗性治理的重要环节，双丙环虫酯内吸传导性强、持效期长，是防治对烟碱类、拟除虫菊酯类、有机磷类和氨基甲酸酯类杀虫剂产生抗性棉蚜的新型理想药剂（Zhang *et al.*，2020；张帅等，2023），是抗性害虫综合治理（IRM）的重要工具药剂。溴虫氟苯双酰胺具有广谱、高效和内吸性强等特点，对半翅目、鳞翅目和鞘翅目等多种害虫均具有较高活性（Katsuta *et al.*，2019；Li *et al.*，2022b；Zhang *et al.*，2023），害虫对该杀虫剂不易产生抗药性，且与其他常用杀虫剂之间交叉抗性风险较低（Nakao and Banba，2016）。氟吡呋喃酮具有较好的内吸传导性，可有效防治蚜虫等主要刺吸式口器害虫（陈敏等，2017；Issa *et al.*，2022），并且不被细胞色素 P450 酶 CYP6CM1 代谢，对新烟碱类农药具有代谢抗性，对粉虱和蚜虫等抗性害虫有效（Jeschke *et al.*，2015）。三氟苯嘧啶与新烟碱类乙酰胆碱受体激活剂靶点相同，作用方式相反（Cordova *et al.*，2016），与其他新烟碱类药剂相比，表现出更佳的速效性和持效期（Chen *et al.*，2020），防治对吡虫啉产生代谢抗性的飞虱时，依然表现出较高杀虫活性，可用于抗药性飞虱的治理（Holyoke *et al.*，2017）。

增效剂是一种重要的农药助剂，本身并无活性，与相应农药混合后，能明显改善其润湿、展布、分散、滞留和渗透性能（孙妍等，2024），提高生物活性，减少用量，降低成本，延缓抗药性（杨石有等，2019）。基于此，我们结合室内活性测定、物理性状测定和田间药效评价，研究了 6 种增效助剂对 4 种新型杀虫剂的减施增效作用及其原因，筛选出速效性好、持效期长、减施增效作用明显的组合。本研究为棉蚜的高效防控提供了依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

棉蚜室内试验种群于 2012 年采自河北省保定市棉田，在养虫室内（温度（22±1）℃，湿度 60%-80%，光周期 16 L∶8 D）水培棉苗上不接触任何药剂的情况下饲养。

在河北省邢台市威县枣园乡东张庄村（36°56′N，115°27′E）的棉田进行田间防效验证，试验田为多年连作棉田，田间棉蚜自然发生，发生程度为中度偏重。

1.2　供试药剂

新型杀虫剂：50 g/L 双丙环虫酯可分散液剂（Dispersible concentrate，DC），巴斯夫公司；17%氟吡呋喃酮可溶性液剂（Soluble concentrate，SL），拜耳作物科学公司；10%三氟苯嘧啶悬浮剂（Suspension concentrate，SC），科迪华农业科技有限责任公司；100 g/L 溴虫氟苯双酰胺 SC，巴斯夫植物保护（江苏）有限公司。

增效助剂：橙皮精油（Orange peel essential oil），山东木鱼石生物科技有限公司；英尔果青皮桔油（Green tangerine peel oil），英国英尔果植物保护有限公司；大蒜油（Garlic oil），山东远见化学有限公司；中保云纹青（Zhongbao Yunwenqing），普绿通（重庆）生物科技有限公司；金诺（Jinnuo），东莞市瑞德丰生物科技有限公司；乐透（Letou），浙江世佳科技股份有限公司。

1.3　试验方法

1.3.1　室内生物活性测定　室内生物活性测定采用叶片浸渍法进行（Busvine，1980）。单剂配制方法：将 4 种杀虫剂用清水逐级稀释，配制成 5 个浓度梯度溶液。单剂+增效剂配制方法：根据前期预试验结果，将助剂稀释为对棉蚜无致死作用的最大稀释倍数，即橙皮精油、青皮桔油、大蒜油和中保云纹青用清水稀释成 1 500 倍液，金诺和乐透稀释成 5 000 倍液，以稀释液将 4 种杀虫剂分别逐级稀释。以助剂稀释液处理为对照。将带有棉蚜的棉花叶片浸入药液中 10 s 后取出，自然晾干叶表药液，剔除多余若虫。每浓度设置 3 次重复，每处理不少于 60 头健康、大小一致的 3 龄若虫作为试虫。置于养虫室（温度（22±1）℃，相对湿度 60%-80%，光周期 16 L∶8 D），分别于 24 和 48 h 后检查蚜虫死亡情况，用小毛笔拨动虫体，试虫完全不动视为死亡。计算平均死亡率和校正死亡率，比较致死中浓度（LC_{50}）并计算增效比。

1.3.2　增效剂对杀虫剂物理性状的影响测定

（1）不同增效剂对药液表面张力及接触角的影响

以未添加增效剂的药液为对照，同时设置清水处理保证仪器测试的准确性。在室温（20±1）℃条件下，将各处理的供试药液振荡摇匀，取 30 mL 药液，使用 JK99B 型表面张力仪测定表面张力；另取 1 μL 药液，用 JG2000DM 型接触角测量仪测定瞬时接触角。各处理重复 3 次，计算平均值。通过对比分析各增效剂对药液表面张力及接触角的影响，评估其润湿扩展性能的变化。

（2）不同增效剂对药液在棉花叶片持留量的影响

选取棉花苗期生长状态一致、大小相近、新鲜干净的棉花叶片，裁取成 1 cm×1 cm 的方形样本并称重（记为 w_0）。参照 1.3.1 浸渍法，放入配置好的药液中浸渍 10 s 后用镊子取出，垂直夹住叶片直至液滴自然滴尽后再次称重（记为 w_1），计算药液最大持留量（$RM=w_1-w_0$）。各处理重复 3 次。通过比较不同增效剂处理下的 RM 值，评估其对药液在棉花叶片表面持留能力的影响。

1.3.3　田间药效试验　根据室内试验结果，选取增效比大于 10 的药剂增效剂组合开展田间试验。试验采用茎叶喷雾法，于 2024 年 5 月 22 日棉花苗期棉蚜发生高峰期进行。药前未使用任何化学防治措施，其余田间管理措施与常规棉田一致。以增效剂稀释液配制杀虫剂药液，药液量 450 mL/hm^2。试验共设置 19 个处理如表 1，每处理设置 3 个重复，每小区面积为 20 m^2，采用随机区组排列。

虫情调查采用目测法进行。每小区 5 点取样，每点固定 3 株有蚜植株，记录全株棉蚜数量，每处理共调查 15 个点。施药前调查虫口基数，施药后 1、3 和 7 d 分别调查各处理棉蚜种群数量，计算各处理防治效果。

1.4　数据分析

用 DPS（7.05）软件计算 LC_{50} 值、95%置信区间软件处理。单因素方差分析（One-way ANOVA）使用 SPSS 25.0 软件中的 Duncan 氏新复极差法进行显著性差异检验（$P=0.05$）。添加增效剂处理与相应单剂处理之间的差异采用独立样本 t 检验进行分析（$P<0.05$）。增效比（SR）用 Entwistle 方法计算（Entwistle and Rees，1988）。

$$增效比=\frac{单剂LC_{50}}{（单剂+增效剂）LC_{50}}，$$

$$虫口防效=\frac{处理区虫口减退率-对照区虫口减退率}{1-对照区虫口减退率}\times100\%。$$

2 结果与分析

2.1 增效剂对药剂室内生物活性的影响

室内生物活性测定结果（表 1）表明，4 种药剂添加不同增效剂后对棉蚜生物活性均优于对照组，24 种组合对棉蚜 48 h 的 LC_{50} 介于 0.027 1-22.744 7 mg/L。供试增效剂对氟吡呋喃酮增效比为 6.35-274.36，金诺、青皮桔油、乐透和中保云纹青对氟吡呋喃酮增效作用最明显（$P<0.05$），增效比为 274.36、49.70、22.69 和 11.38。6 种供试增效剂均对三氟苯嘧啶有明显增效作用（$P<0.05$），增效比 2.69-17.57，中保云纹青、青皮桔油和金诺增效作用最佳，增效比依次为 17.57、13.59 和 10.41。供试增效剂对溴虫氟苯双酰胺增效比为 3.00-26.40，其中，添加中保云纹青和橙皮精油增效作用最优，增效比为 26.40 和 11.95。6 种增效剂对双丙环虫酯增效比为 1.01-11.37，中保云纹青对其增效作用显著（$P<0.05$），增效比 11.37。

表 1 6 种增效剂对杀虫剂的增效比

Table 1 Synergistic ratio of 6 synergists mixed treatment to insecticides

处理 Treatment	斜率±标准误 Slope±SE	致死中浓度（95%置信区间）（mg/L） LC_{50} (95% confidence interval) (mg/L)	增效比 Synergistic ratio
三氟苯嘧啶 Triflumezopyrim	1.530 6±0.372 7	61.165 6（44.887 7-128.111 3）	-
三氟苯嘧啶+橙皮精油 Triflumezopyrim+Orange peel essential oil	0.858 3±0.332 5	6.149 4（0.040 8-12.936 0）	9.95*
三氟苯嘧啶+青皮桔油 Triflumezopyrim+Green tangerine peel oil	0.819 8±0.360 6	4.501 9（0.000 0-11.453 8）	13.59*
三氟苯嘧啶+大蒜油 Triflumezopyrim+Garlic oil	0.804 7±0.321 9	22.744 7（6.441 8-34.965 4）	2.69*
三氟苯嘧啶+中保云纹青 Triflumezopyrim+Zhongbao Yunwenqing	1.515 3±0.480 8	3.481 9（0.099 4-8.240 3）	17.57*
三氟苯嘧啶+金诺 Triflumezopyrim+Jinnuo	0.747 5±0.353 0	4.876 1（0.000 0-12.442 0）	10.41*
三氟苯嘧啶+乐透 Triflumezopyrim+Letou	1.858 9±0.353 9	18.956 3（13.262 2-23.481 3）	3.23*
氟吡呋喃酮 Flupyrfurone	0.805 9±0.172 3	7.435 1（2.213 3-13.068 5）	-
氟吡呋喃酮+橙皮精油 Flupyrfurone+Orange peel essential oil	0.990 0±0.184 2	1.171 2（0.193 5-2.806 5）	6.35
氟吡呋喃酮+青皮桔油 Flupyrfurone+Green tangerine peel oil	0.472 6±0.151 6	0.149 6（0.000 0-1.151 5）	49.70*
氟吡呋喃酮+大蒜油 Flupyrfurone+Garlic oil	0.868 3±0.177 0	0.795 9（0.077 0-2.252 6）	9.34
氟吡呋喃酮+中保云纹青 Flupyrfurone+Zhongbao Yunwenqing	0.719 6±0.164 0	0.654 3（0.033 0-2.151 6）	11.38*
氟吡呋喃酮+金诺 Flupyrfurone+Jinnuo	0.551 4±0.207 0	0.027 1（0.000 0-0.517 2）	274.36*
氟吡呋喃酮+乐透 Flupyrfurone+Letou	0.619 2±0.152 7	0.327 7（0.005 5-1.431 5）	22.69*
双丙环虫酯 Afidopyropen	1.195 3±0.355 5	17.249 6（12.685 9-27.540 2）	-
双丙环虫酯+橙皮精油 Afidopyropen+Orange peel essential oil	1.345 8±0.358 6	12.922 9（8.905 3-16.974 8）	1.33
双丙环虫酯+青皮桔油 Afidopyropen+Green tangerine peel oil	1.639 2±0.350 8	9.938 7（6.695 9-12.461 1）	1.74

续表 1 (Table 1 continued)

处理 Treatment	斜率±标准误 Slope±SE	致死中浓度（95%置信区间）（mg/L） LC_{50} (95% confidence interval) (mg/L)	增效比 Synergistic ratio
双丙环虫酯+大蒜油 Afidopyropen+Garlic oil	1.732 1±0.351 6	13.674 6（10.803 6-16.819 2）	1.26
双丙环虫酯+中保云纹青 Afidopyropen+Zhongbao Yunwenqing	2.045 5±0.268 0	1.516 6（0.813 8-2.234 8）	11.37*
双丙环虫酯+金诺 Afidopyropen+Jinnuo	1.882 0±0.370 0	13.469 3（10.673 7-16.463 9）	1.28
双丙环虫酯+乐透 Afidopyropen+Letou	1.140 5±0.359 5	17.147 0（12.336 9-28.681 2）	1.01
溴虫氟苯双酰胺 Broflanilide	2.362 1±0.549 6	33.930 5（26.537 6-59.755 2）	-
溴虫氟苯双酰胺+橙皮精油 Broflanilide+Orange peel essential oil	1.155 5±0.390 2	2.839 2（0.069 4-6.288 3）	11.95*
溴虫氟苯双酰胺+青皮桔油 Broflanilide+Green tangerine peel oil	2.053 0±0.449 2	5.310 2（1.990 5-8.083 0）	6.39*
溴虫氟苯双酰胺+大蒜油 Broflanilide + Garlic oil	1.310 2±0.398 4	5.299 4（0.790 8-8.986 3）	6.40*
溴虫氟苯双酰胺+中保云纹青 Broflanilide+Zhongbao Yunwenqing	0.876 0±0.420 1	1.285 4（0.000 0-4.911 5）	26.40*
溴虫氟苯双酰胺+金诺 Broflanilide+Jinnuo	1.117 2±0.380 4	8.770 7（1.763 6-13.225 4）	3.87*
溴虫氟苯双酰胺+乐透 Broflanilide+Letou	1.760 6±0.397 7	11.304 0（6.937 2-14.508 6）	3.00*

表中数值为平均值±标准误，*表示添加增效剂处理与各单剂处理差异显著（$P < 0.05$，t 检验）。

Data in the table are presented as mean±SE, and * indicates significant difference between the treatment with synergist addition and the corresponding insecticide alone ($P < 0.05$, t-test).

2.2　增效剂对药剂张表面力、接触角与持留量的影响

2.2.1　表面张力　从药剂稀释液表面张力测定结果（图 1：A-D）来看，溴虫氟苯双酰胺添加增效剂后表面张力下降了 14.23%-38.56%，增效剂对其降低效果表现为乐透 > 金诺 > 中保云纹青 > 青皮桔油 > 橙皮精油 > 大蒜油，均显著低于对照组（$P < 0.05$）；各增效剂对氟吡呋喃酮添表面张力降低了 3.47%-28.34%，对三氟苯嘧啶表面张力降低了 2.05%-20.63%，其中，中保云纹青、乐透、金诺、青皮桔油和橙皮精油均对氟比呋喃酮和三氟苯嘧啶表面张力降低作用明显（$P < 0.05$）；双丙环虫酯表面张力降低了 1.76%-21.92%，其中乐透、中保云纹青和金诺的降低作用最为显著（$P < 0.05$）。

2.2.2　接触角　从药剂稀释液接触角测定结果（图 2：A-D）来看，乐透对氟吡呋喃酮接触角降低了 15.79%，其余 5 种增效剂未降低该药剂接触角；乐透、青皮桔油和橙皮精油使双丙环虫酯接触角降低了 6.01%-12.73%；6 种增效剂对三氟苯嘧啶接触角降低了 0.52%-11.18%，其中金诺、中保云纹青、青皮桔油和乐透对其接触角降低作用明显（$P < 0.05$）；除橙皮精油，其他 5 种增效剂使溴虫氟苯双酰胺接触角降低了 0.16%-7.74%。

2.2.3　持留量　从药剂稀释液持留量测定结果（图 3：A-D）来看，增效剂金诺显著提高了三氟苯嘧啶药液在叶片表面的持留量（$P < 0.05$），增幅达 87.50%，而其余供试增效剂均使三氟苯嘧啶在叶片上的持留量有所下降；大蒜油、青皮桔油和中保云纹青对氟吡呋喃酮稀释液在叶片上的持留量增加效果最明显（$P < 0.05$），持留量分别提高 64.70%、64.51%和 12.38%；除大蒜油外，其余 5 种增效剂对双丙环虫酯稀释液在叶片上的持留量均有显著提高（$P < 0.05$），对其持留量的提升效果依次为金诺 > 橙皮精油 > 乐透 > 中保云纹青 > 青皮桔油，持留量分别提高

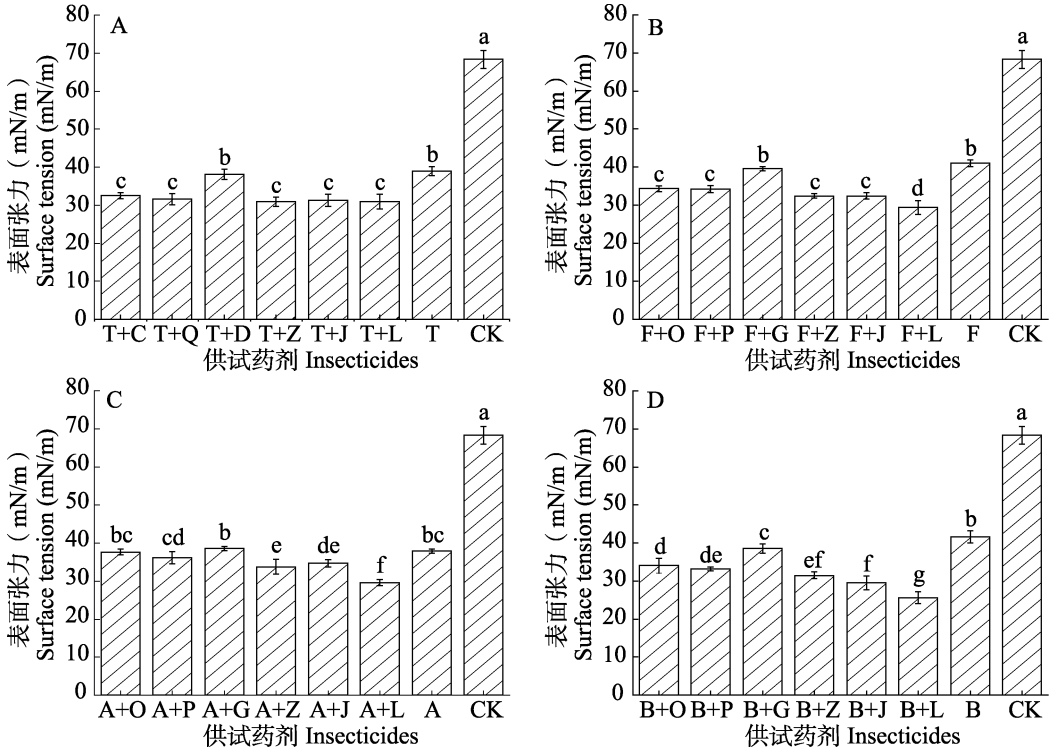


图 1　增效剂对杀虫剂表面张力的影响

Fig. 1　Effect of synergist on insecticide surface tension

A. 三氟苯嘧啶 + 增效助剂的表面张力；B. 氟吡呋喃酮 + 增效助剂的表面张力；
C. 双丙环虫酯 + 增效助剂的表面张力；D. 溴虫氟苯双酰 + 增效助剂的表面张力。横坐标：
T：三氟苯嘧啶，F：氟吡呋喃酮，A：双丙环虫酯，B：溴虫氟苯双酰胺；O：橙皮精油，
P：青皮桔柚，G：大蒜油，Z：中保云纹清，J：金诺，L：乐透；CK：清水对照。
图中数据为平均值±标准差，不同字母表示各处理差异显著（$P < 0.05$，Duncan 氏新复极差法检验）。下图同。
A. Surface tension of triflumezopyrim+synergist; B. Surface tension of flupyradifurone + synergist;
C. Surface tension of afidopyropen+synergist; D. Surface tension of broflanilide+synergist.
X-axis: T: Triflumezopyrimidine; F: Flupyradifurone; A: Afidopyropen; B: Broflanilide; O: Orange peel essential oil; P: Green tangerine peel oil; G: Garlic oil; Z: Zhongbao Yunwenqing; J: Jinnuo; L: Letou; CK: Distilled water as the control.
Data in the figure are mean±SD. Different lowercase letters above bars indicate significant difference at the 0.05 level by Duncan's multiple range test. The same below.

90.39%、57.88%、41.87%、29.80%和 27.83%；6 种供试增效剂均显著降低了溴虫氟苯双酰胺在叶片表面的持留量，添加橙皮精油和大蒜油的处理，药液持留量甚至低于清水对照。

2.3　增效剂对 4 种杀虫剂田间防治棉蚜的减施增效作用

10%三氟苯嘧啶悬浮剂减量 30%较常规用量处理防效显著降低（$P < 0.05$），但在减量基础上添加增效剂，可明显提升防效甚至超越常规剂量处理（$P < 0.05$）。药后 1 d，添加青皮桔油和中保云纹青处理防效分别为 49.03%和 44.24%，显著优于三氟苯嘧啶单独减量处理（$P < 0.05$）；药后 3 d，青皮桔油和中保云纹青处理防效分别达 94.00%和 92.32%，显著高于三氟苯嘧啶常规剂量处理（$P < 0.05$）；药后 7 d，中保云纹青处理防效为 89.49%，青皮桔油处理防效为 82.86%，均高于三氟苯嘧啶常规剂量（表 2）。相比之下，金诺增效作用相对较弱，青皮桔油和中保云纹青与三氟苯嘧啶混配可在保持或提高防效的同时，有效降低棉田百株蚜量，减施增效效果显著（$P < 0.05$）。

与 17%氟吡呋喃酮可溶性液剂减量 30%相比，添加增效剂后，防效显著提升（$P < 0.05$）。

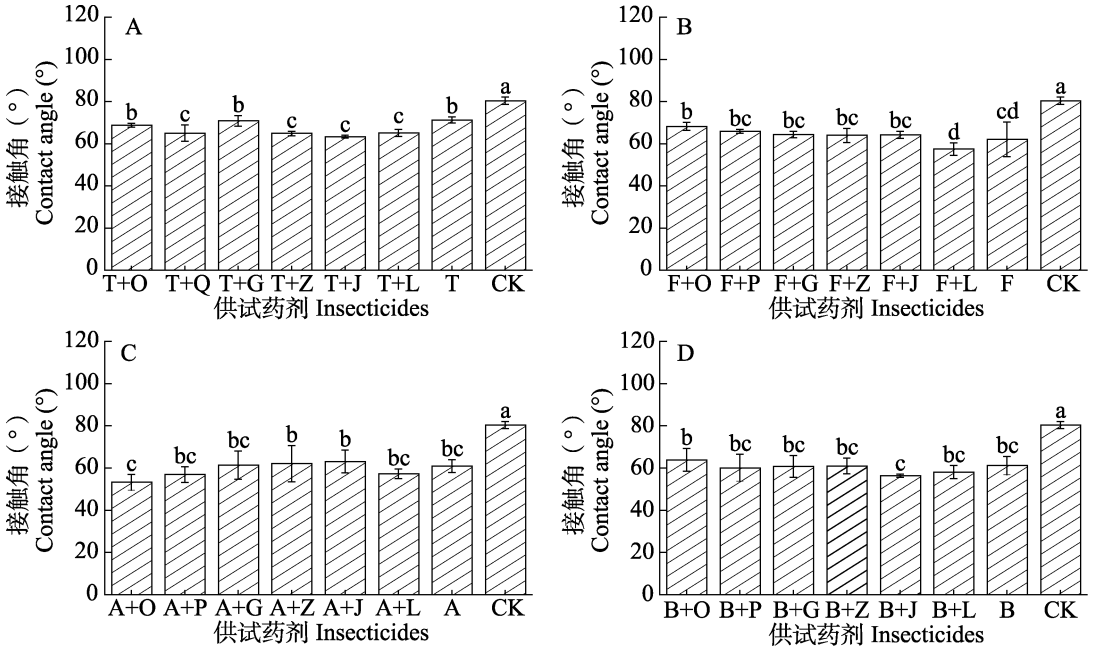


图 2　增效剂对杀虫剂接触角的影响

Fig. 2　Effect of synergist on insecticide contact angle

A. 三氟苯嘧啶 + 增效助剂的接触角；B. 氟吡呋喃酮 + 增效助剂的接触角；

C. 双丙环虫酯 + 增效助剂的接触角；D. 溴虫氟苯双酰 + 增效助剂的接触角。

A. Contact angle of triflumezopyrim+synergist; B. Contact angle of flupyradifurone + synergist;
C. Contact angle of afidopyropen+synergist; D. Contact angle of broflanilide+synergist.

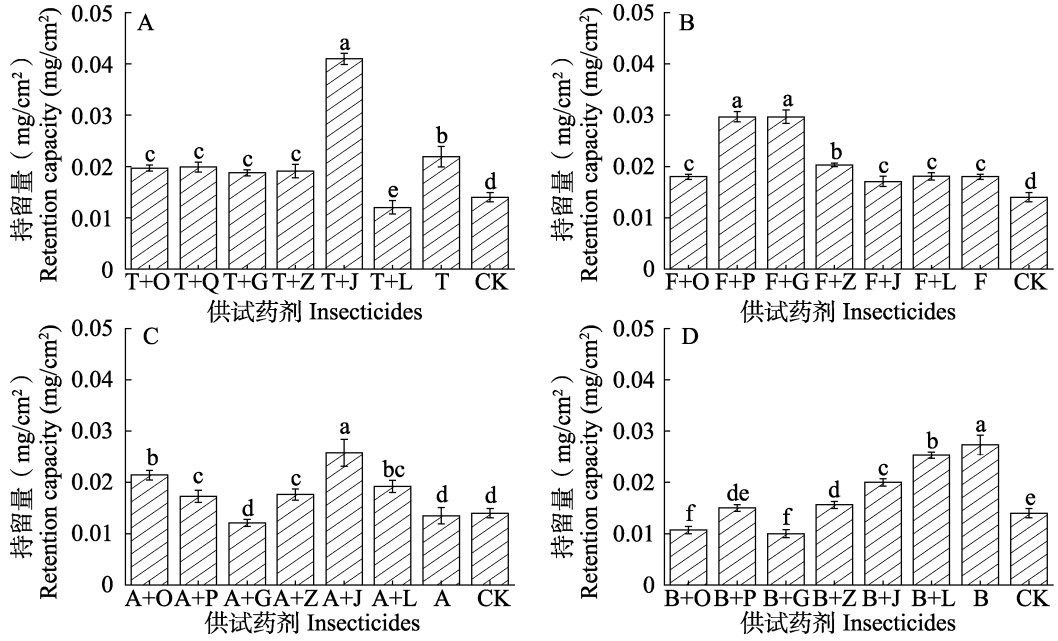


图 3　增效剂对杀虫剂持留量的影响

Fig. 3　Effect of synergist on Insecticide retention capacity

A. 三氟苯嘧啶 + 增效助剂的持留量；B. 氟吡呋喃酮 + 增效助剂的持留量；

C. 双丙环虫酯 + 增效助剂的持留量；D. 溴虫氟苯双酰 + 增效助剂的持留量。

A. Retention capacity of triflumezopyrim+synergist; B. Retention capacity of flupyradifurone + synergist;
C. Retention capacity of afidopyropen+synergist; D. Retention capacity of broflanilide+synergist.

表 2　不同增效剂对三氟苯嘧啶防治棉蚜的增效作用

Table 2　The synergistic effect of different synergists to triflumezopyrim against *Aphis gossypii*

供试药剂 Insecticide	施药剂量（mL/hm^2） Application rate (mL/hm^2)	药后 1 d 1 d after application		药后 3 d 3 d after application		药后 7 d 7 d after application	
		百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)	百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)	百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)
10%三氟苯嘧啶悬浮剂 10% Triflumezopyrim suspension concentrate	240	31 067±6 603 a	6.48±6.09 c	25 267±4 214 b	78.34±2.46 b	26 267±3 837 b	79.69±2.55 b
10%三氟苯嘧啶悬浮剂 10% Triflumezopyrim suspension concentrate	168	5 189±1 270 b	4.39±3.24 c	5 618±1 458 cd	70.88±1.31 d	16 911±3 508 c	20.48±5.77 d
10%三氟苯嘧啶悬浮剂+青皮桔油 10% Triflumezopyrim suspension concentrate + Green tangerine peel oil	168+1：1 500（v/v）	6 244±1 979 b	49.03±4.90 a	2 584±785 d	94.00±0.83 a	8 444±3 138 d	82.86±1.32 b
10%三氟苯嘧啶悬浮剂+中保云纹青 10% Triflumezopyrim suspension concentrate + Zhongbao Yunwenqing	168 +1：1 500（v/v）	5 624±1 151 b	44.24±1.79 a	2 740±529 cd	92.32±0.50 a	4 169±780 d	89.49±0.56 a
10%三氟苯嘧啶悬浮剂+金诺 10% Triflumezopyrim suspension concentrate + Jinnuo	168+1：5 000（v/v）	6 245±1 759 b	23.02±2.48 b	7 111±1 927 c	75.14±0.37 c	16 022±3 937 c	49.66±1.21 c
清水（对照）Distilled water (CK)	-	8 955±1 201 b	-	31 800±4 584 a	-	35 178±4 009 a	-

表中数据为平均值±标准差，同列数据不同字母表示不同药剂处理差异显著（$P < 0.05$，Duncan 氏新复极差法检验）。1：1 500（v/v）表示增效剂稀释至 1 500 倍液，1：5 000（v/v）表示增效剂稀释至 5 000 倍液。下表同。

The date in the table are mean±SD. Different letters within the same column indicate significant difference ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test). 1：1 500 (v/v) indicates that the synergist was diluted to a 1 500-fold solution , and 1：5 000 (v/v) indicates dilution to a 5 000-fold solution. The same below.

药后 1 d，添加青皮桔油、中保云纹青和乐透处理的防效分别为 87.56%、84.23%和 76.5%，均高于氟吡呋喃酮常规用量处理，表现出良好的速效性；药后 3 d，乐透和中保云纹青处理防效分别达到 99.70%和 99.07%，显著优于常规剂量处理（$P < 0.05$），添加青皮桔柚处理防效为 98.02%，明显优于单剂减量处理且防效优于常规剂量处理（$P < 0.05$）；药后 7 d，乐透处理防效维持在 98.19%，青皮桔油和中保云纹青处理防效分别为 96.04%和 94.74%，均明显高于氟吡呋喃酮单独减量处理（$P < 0.05$）。中保云纹青、青皮桔油和乐透能够显著提升 17%氟吡呋喃酮 SL 防效，甚至达到或超过其常规用量的效果（表 3）。

50 g/L 双丙环虫酯可分散液剂药后 1 d 速效性较差，但在药后 3、7 和 14 d 均表现出极高的虫口减退率和防效（表 4）。减量 30%处理时，药后 1 d 防效仅为 6.07%，显著低于常规剂量处理水平（$P < 0.05$）。添加增效剂中保云纹青后，在药后各时期均显著降低百株蚜量并提升防效（$P < 0.05$）。药后 1 d，中保云纹青处理防效为 42.94%，明显高于单剂减量处理（$P < 0.05$）；药后 3 d 防效达 99.91%，与常规剂量处理效果相当；药后 7 d 防效达到 99.98%，至药后 14 d 仍维持在 99.68%，显著优于减量处理（$P < 0.05$）。中保云纹青与双丙环虫酯减量混配不仅能够在短期内快速降低蚜虫种群密度，还可在药后 14 d 维持持久防效，实现显著的减施增效效果（$P < 0.05$）。

100 g/L 溴虫氟苯双酰胺悬浮剂按常规用量喷施后防效较低，且随时间推移防治效果不稳定，当剂量减少 30%时，防效显著下降（$P < 0.05$）。100 g/L 溴虫氟苯双酰胺悬浮剂减量 30%后添加橙皮精油和中保云纹青，防效均明显高于常规用量处理（$P < 0.05$），药后 1 d 防效分别为 52.28%和 51.20%，药后 3 d 为 78.43%和 79.14%，至第 7 天防效维持在 59.32%和 74.15%。其中，减量 30%+中保云纹青表现最佳，与常规用量相比，整体防效提升了 35.20%-47.40%（表 5）。

3　结论与讨论

近年来，新型杀虫剂陆续应用于棉蚜防治，如磺酰亚胺类的氟啶虫胺腈、吡啶酰胺类的氟啶虫酰胺以及生物源杀虫剂等，虽然这些药剂在应用初期都表现出良好的防治效果，但由于防治手段的单一性及不合理使用，棉蚜同样对其产生了不同程度抗性（安静杰等，2020；Li *et al.*，2022a；Shi *et al.*，2023）。因此，延缓棉蚜抗药性发展、提升药剂利用率，已成为当前绿色防控技术研究的重要方向。

合理添加增效剂是延缓害虫抗性发展的有效途径（石丹丹等，2023），研究表明，添加增效剂可以改善药液的表面张力及接触角，进而增强药液在植物表面的附着性与展布性，显著提高药效，达到增效目的（张晨辉等，2019）。本研究通过测定增效剂对新型杀虫剂物理性状的影响发现，与未添加增效剂的药液相比，添加增效剂可使表面张力降低 1.76%-38.56%，接触角降低 0.16%-15.79%。其中，增效剂中保云纹青对 4 种供试新型杀虫剂药液的表面张力及接触角均有不同程度的降低作用，田间药效试验进一步证实，该增效剂对 4 种杀虫剂均表现出显著的增效效果，表明其在棉蚜绿色防控和农药减施增效技术应用方面具有良好的应用潜力。值得注意的是，本研究观察到增效剂与杀虫剂混配时，药液在叶片表面持留量反而出现降低的情况，这一结果与已有研究中增效剂提高药液持留量的结论存在一定差异（Hu *et al.*，2024）。造成该现象的可能原因包括所用杀虫剂、增效剂种类自身的理化性质不同，或试验中使用的植物叶面特性存在差异，以及不同试验条件也可能影响药液的分布行为。助剂的使用影响药液的保留量，不同助剂表现出不同的变化规律（Ding *et al.*，2023），因此，有必要在后续研究中进一步探究不同药剂类型、增效剂配方及作物叶面结构等因素对药液持留行为的具体影响机制，以进一步优化增效剂的筛选和使用。

增效助剂的合理使用不仅可以提高杀虫剂对靶标害虫的防治作用，还能达到减少杀虫剂用

表 3　不同增效剂对氟吡呋喃酮防治棉蚜的增效作用

Table 3　The synergistic effect of different synergists to flupyrfurone against *Aphis gossypii*

供试药剂 Insecticide	施药剂量 (mL/hm^2) Application rate (mL/hm^2)	药后 1 d 1 d after application		药后 3 d 3 d after application		药后 7 d 7 d after application	
		百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)	百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)	百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)
17%氟吡呋喃酮可溶性液剂 17% Flupyrfurone soluble concentrate	750 mL/hm^2	3 000±176 b	70.77±3.41 bc	1 275±292 b	96.40±1.40 bc	909±287 c	97.68±1.04 a
17%氟吡呋喃酮可溶性液剂 17% Flupyrfurone soluble concentrate	525 mL/hm^2	2 767±260 b	69.59±5.28 c	1 440±196 b	95.59±0.40 c	5 347±1 198 b	85.33±2.57 c
17%氟吡呋喃酮可溶性液剂+青皮桔油 17% Flupyrfurone soluble concentrate+ Green tangerine peel oil	525 mL/hm^2+ 1∶1 500（v/v）	1 458±407 de	87.56±2.53 a	771±106 b	98.02±0.80 ab	1 795±265 c	96.04±0.77 ab
17%氟吡呋喃酮可溶性液剂+中保云纹青 17% Flupyrfurone soluble concentrate+ Zhongbao Yunwenqing	525 mL/hm^2+ 1∶1 500（v/v）	745±189 e	84.23±0.74 a	176±144 b	99.07±0.60 a	987±316 c	94.74±0.80 b
17%氟吡呋喃酮可溶性液剂+金诺 17% Flupyrfurone soluble concentrate+Jinnuo	525 mL/hm^2+ 1∶5 000（v/v）	1 780±254 cd	65.08±4.60 c	1 246±520 b	93.27±2.07 d	2 686±806 c	86.95±1.31 c
17%氟吡呋喃酮可溶性液剂+乐透 17% Flupyrfurone soluble concentrate+Letou	525 mL/hm^2+ 1∶5 000（v/v）	2 356±560 bc	76.50±3.47 b	102±51 b	99.70±0.18 a	529±631 c	98.19±2.48 a
清水（对照）Distilled water (CK)	-	8 955±1 201 a	-	31 800±4 584 a	-	35 178±4 009 a	-

表 4　不同增效剂对双丙环虫酯防治棉蚜的增效作用

Table 4　The synergistic effect of different synergists to afidopyropen against *Aphis gossypii*

供试药剂 Insecticide	施药剂量（mL/hm²） Application rate (mL/hm²)	药后 1 d 1 d after application		药后 3 d 3 d after application		药后 7 d 7 d after application		药后 14 d 14 d after application	
		百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)	百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)	百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)	百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)
50 g/L 双丙环虫酯可分散液剂 50g/L Afidopyropen dispersible concentrate	240 mL/hm²	5 000±1 947 b	40.21±6.23 a	87±7 b	99.67±0.15 b	33±41 b	99.89±0.12 a	120±46 b	99.52±0.15 a
50 g/L 双丙环虫酯可分散液剂 50 g/L Afidopyropen dispersible concentrate	168 mL/hm²	9 534±1 815 a	6.07±3.24 b	138±37 b	99.62±0.08 b	78±49 b	99.80±0.11 a	3 411±686 b	91.17±3.41 b
50 g/L 双丙环虫酯可分散液剂+中保云纹青 50 g/L Afidopyropen dispersible concentrate+ Zhongbao Yunwenqing	168 mL/hm²+ 1∶1 500（v/v）	9 878± 1 503 a	42.94±1.35 a	53±14 b	99.91±0.03 a	13±23 b	99.98±0.03 a	216±68 b	99.68±0.13 a
清水（对照） Distilled water (CK)	-	8 955±1 201 b	-	31 800±4 584 a	-	35 178±4 009 a	-		

表 5　不同增效剂对溴虫氟苯双酰胺防治棉蚜的增效作用

Table 5　The synergistic effect of different synergists to broflanilide against *Aphis gossypii*

供试药剂 Insecticide	施药剂量（mL/hm^2） Application rate (mL/hm^2)	药后 1 d 1 d after application		药后 3 d 3 d after application		药后 7 d 7 d after application	
		百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)	百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)	百株蚜量（头） Number of aphids per 100 plants (ind.)	防效（%） Control efficiency (%)
100 g/L 溴虫氟苯双酰胺悬浮剂 100 g/L Broflanilide suspension concentrate	240 mL/hm^2	5 131±1 047 c	27.85±5.80 b	10 789±2 387 c	57.47±0.48 b	21 234±5 581 b	25.21±4.78 c
100 g/L 溴虫氟苯双酰胺悬浮剂 100 g/L Broflanilide suspension concentrate	168 mL/hm^2	10 644±379 a	4.59±4.34 c	17 556±796 b	43.94±2.45 c	13 767±1 486 cd	26.75±4.45 c
100 g/L 溴虫氟苯双酰胺悬浮剂+橙皮精油 100 g/L Broflanilide suspension concentrate+ Orange peel essential oil	168 mL/hm^2+ 1∶1 500（v/v）	5 789±1 232 c	52.28±4.82 a	9 333±2 198 c	78.43±1.63 a	19 822±5 846 bc	59.32±1.45 b
100 g/L 溴虫氟苯双酰胺悬浮剂+中保云纹青 100 g/L Broflanilide suspension concentrate+ Zhongbao Yunwenqing	168 mL/hm^2+ 1∶1 500（v/v）	4 367±623 c	51.20±2.16 a	6 589±589 c	79.14±1.28 a	9 111±1 143 d	74.15±0.40 a
清水（对照）Distilled water (CK)	-	8 955±1 201 b	-	31 800±4 584 a	-	35 178±4 009 a	-

量的目的。农用新型增效剂 0. 15% Fieldor Max 乳油对吡虫啉和噻虫嗪有明显减量增效作用，药剂减量 10%-20%后添加增效剂，对棉蚜防效提高了 8.99%-27.51%（张谦等，2021）。新烟碱类杀虫剂通过添加青皮桔柚、有机硅和激健可使农药减量 30%（李世奎等，2019）。在本研究中，10%三氟苯嘧啶悬浮剂减量 30%后添加青皮桔油或中保云纹青，100 g/L 溴虫氟苯双酰胺悬浮剂减量 30%后添加橙皮精油或中保云纹青，均在一定程度上提高了对棉蚜的防治效果，然而，这些组合的防效水平未达到理想标准，与常规剂量处理或效果更显著的增效组合相比，防治效果仍显不足，因此，这些组合不作为主要推荐方案。氟比呋喃酮和双丙环虫酯按照推荐剂量减量 30%后添加增效剂防治棉蚜，施药后第 7 天仍可维持极高的防效，防治效果均超过 99%。这一结果不仅验证了增效剂在提升药效方面的显著作用，也为农药减施提供了实证依据。在确保作物安全和防效稳定的前提下，后续试验设计中可进一步探索更大幅度的药剂减量策略，为高效、安全、可持续的棉蚜综合防控提供技术支撑。

本研究发现不同的增效助剂对杀虫剂的增效作用存在显著差异，例如 17%氟吡呋喃酮可溶性液剂与增效剂乐透混用，对棉蚜的防治效果为 98.19%，显著高于与增效剂金诺混用（86.95%）。钟婧尹等（2025）也发现顺丁烯二酸二乙酯（Diethyl maleate，DEM）对三氟甲吡醚防治小菜蛾 *Plutella xylostella* 具有增效作用，增效比为 2.03，而增效醚（Piperonyl butoxide，PBO）、脱叶磷（S,S,S-Tributyl phosphorotrithioate，DEF）和磷酸三苯酯（Triphenyl phosphate，TPP）对三氟甲吡醚无增效作用。与单独使用高效氯氰菊酯相比，使用高效氯氰菊酯+PBO 筛选的烟粉虱 *Bemisia tabaci* 抗性品系的抗性发展明显受到抑制，而噻虫啉和噻虫啉+PBO 筛选的品系中，抗性水平无显著差异（Zimmer *et al.*，2017）。这些结果表明，不同增效剂与杀虫剂的配伍存在明显的选择性，增效剂与农药的配伍仍需结合药剂理化性质及增效剂作用机制，开展更系统的筛选与优化研究，为农药减施增效提供更加科学和可行的技术依据。此外，增效助剂对农药的增效效果受多种因素影响，组合剂量、应用时机及昆虫抗性背景也会显著影响协同效果（Huang *et al.*，2010）。

本文结果表明，青皮桔油、中保云纹青和乐透在棉蚜绿色防控和农药减施增效技术应用方面有较好的应用潜力。综合本研究室内和田间试验效果，推荐使用 50 g/L 双丙环虫酯可分散液剂+中保云纹青为防治棉蚜的首选增效组合，可与 17%氟吡呋喃酮可溶性液剂+乐透轮换使用，以延缓棉蚜抗药性的发展。研究结果为充分挖掘现有杀虫剂在棉蚜防控中应用潜力，为提升棉蚜绿色防控水平提供了科学依据。

参考文献 (References)

An JJ, Dang ZH, Gao ZL, Lv HY, Peng JH, Pan WL, Li YF, 2018. Sensitivity baseline and resistance of Hebei *Aphis gossypii* Glover population to neonicotinoid insecticides. *Journal of Hebei Agricultural University*, 41(4): 112–116. [安静杰, 党志红, 高占林, 吕海英, 彭建红, 潘文亮, 李耀发, 2018. 河北省棉蚜对新烟碱类杀虫剂敏感基线及抗药性水平. 河北农业大学学报, 41(4): 112–116.]

An JJ, Dang ZH, Gao ZL, Yan X, Pan WL, Li YF, 2020. Development and risk assessment of resistance to sulfoxaflor in cotton aphid (*Aphis gossypii*). *Journal of Hebei Agricultural University*, 43(1): 76–81. [安静杰, 党志红, 高占林, 闫秀, 潘文亮, 李耀发, 2020. 棉蚜对氟啶虫胺腈抗性发展动态及田间种群抗性风险评估. 河北农业大学学报, 43(1): 76–81.]

Busvine JR, 1980. Recommended methods for measurement of pest resistance to pesticides. *Bulletin of the World Health Organization*, 58(Suppl. 1): 1–146.

Chen L, Wang X, Zhang YZ, Yang R, Zhang SR, Xu X, Zhu MJ, Gong CW, Hasnain A, Shen LT, Jiang CX, 2020. The population growth, development and metabolic enzymes of the white-backed planthopper, *Sogatella furcifera* (Hemiptera: Delphacidae) under the sublethal dose of triflumezopyrim. *Chemosphere*, 247: 125865.

Chen M, Luan BH, Yi XJ, Shi J, Wang PS, 2017. Field efficacy trials of flupyradifurone against *Bemisia tabaci*. *Agrochemicals*, 56(5): 380–383. [陈敏, 栾炳辉, 衣先家, 石洁, 王培松, 2017. 新型杀虫剂氟吡呋喃酮对番茄烟粉虱田间药效评价. 农药, 56(5): 380–383.]

Cordova D, Benner EA, Schroeder ME, Holyoke CW, Zhang W, Pahutski TF, Leighty RM, Vincent DR, Hamm JC, 2016. Mode of action of triflumezopyrim: A novel mesoionic insecticide which inhibits the nicotinic acetylcholine receptor. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 74: 32–41.

Ding L, Zhou X, Liang XJ, Dong YJ, Fang CB, Wu YM, Li BX, Mu W, Lin J, Li YK, 2023. Achieving high efficacy and low safety risk by balancing pesticide deposition on leaves and fruits of Chinese wolfberry (*Lycium barbarum* L.). *ACS Omega*, 8(16): 14672–14683.

Entwistle G, Rees TA, 1988. Enzymic capacities of amyloplasts from wheat (*Triticum aestivum*) endosperm. *Biochemical Journal*, 255(2): 391–396.

Fan YJ, Fen L, Abd Allah AH, Yi XQ, Zhang M, Desneux N, Gao XW, 2018. The damage risk evaluation of *Aphis gossypii* on wheat by host shift and fitness comparison in wheat and cotton. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(3): 631–639.

Holyoke CW Jr, Cordova D, Zhang WM, Barry JD, Leighty RM, Dietrich RF, Rauh JJ, Pahutski TF Jr, Lahm GP, Tong MT, Benner EA, Andreassi JL, Smith RM, Vincent DR, Christianson LA, Teixeira LA, Singh V, Hughes KA, 2017. Mesoionic insecticides: A novel class of insecticides that modulate nicotinic acetylcholine receptors. *Pest Management Science*, 73(4): 796–806.

Hu HY, Ma YJ, Song XP, Wang D, Ren XL, Wu CC, Liu CH, Ma XY, Shan YP, Meng YH, Ma Y, 2024. Tank-mix adjuvants enhance pesticide efficacy by improving physicochemical properties and spraying characteristics for application to cotton with unmanned aerial vehicles. *ACS Omega*, 9(28): 31011–31025.

Huang QC, Deng YF, Zhan TS, He Y, 2010. Synergistic and antagonistic effects of piperonyl butoxide in fipronil-susceptible and resistant rice stem borrers, *Chilo suppressalis*. *Journal of Insect Science*, 10: 182.

Issa KA, Wosula EN, Stephano F, Legg JP, 2022. Evaluation of the efficacy of flupyradifurone against *Bemisia tabaci* on cassava in Tanzania. *Insects*, 13(10): 920.

Jeschke P, Nauen R, Gutbrod O, Beck ME, Matthiesen S, Haas M, Velten R, 2015. Flupyradifurone (Sivanto™) and its novel butenolide pharmacophore: Structural considerations. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 121: 31–38.

Katsuta H, Nomura M, Wakita T, Daido H, Kobayashi Y, Kawahara A, Banba S, 2019. Discovery of broflanilide, a novel insecticide. *Journal of Pesticide Science*, 44(2): 120–128.

Li R, Cheng SH, Liang PZ, Chen ZB, Zhang YJ, Liang P, Zhang L, Gao XW, 2022a. Status of the resistance of *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) to afidopyropen originating from microbial secondary metabolites in China. *Toxins*, 14(11): 750.

Li R, Cheng SH, Chen ZB, Guo TF, Liang PZ, Zhen CG, Wang JH, Zhang L, Gao XW, 2022b. Establishment of toxicity and susceptibility baseline of broflanilide for *Aphis gossypii* Glover. *Insects*, 13(11): 1033.

Li SK, Li BW, Zheng X, Ning ZX, Zhang YC, Wang S, He C, Lu W, 2019. Synergistic effects of three adjuvants combined with three neonicotinoid insecticides against *Aphis gossypii*. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 56(1): 32–37. [李世奎, 李博文, 郑鑫, 宁忠雄, 章雅春, 王爽, 何闯, 路伟, 2019. 3 种增效剂与 3 种烟碱类杀虫剂混配对棉蚜的增效作用. 新疆农业科学, 56(1): 32–37.]

Li Y, Zhu H, Shan Y, Wang ZS, 2023. Resistance monitoring and resistant mechanism progress of *Aphis gossypii* to imidacloprid and sulfoxaflor. *China Cotton*, 50(2): 1–5. [李越, 朱鹤, 单莹, 王子胜, 2023. 棉蚜对吡虫啉和氟啶虫胺腈抗药性监测及抗性机理研究进展. 中国棉花, 50(2): 1–5.]

Nakao T, Banba S, 2016. Broflanilide: A meta-diamide insecticide with a novel mode of action. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 24(3): 372–377.

Patima·Wurihan, Guo PP, Ma SJ, Gao XW, Zhang LJ, Zhang S, Ma DY, 2019. Resistance of different field populations of *Aphis gossypii* to ten insecticides in Xinjiang. *Plant Protection*, 45(6): 273–278. [帕提玛·乌木尔汗, 郭佩佩, 马少军, 高希武, 张连俊, 张帅, 马德英, 2019. 新疆地区棉蚜田间种群对 10 种杀虫剂的抗性. 植物保护, 45(6): 273–278.]

Shi DD, Wang TT, Lv HX, Li XC, Wan H, He S, You H, Li JH, Ma KS, 2023. Insecticide resistance monitoring and diagnostics of resistance mechanisms in cotton-melon aphid, *Aphis gossypii* Glover in Central China. *Journal of Applied Entomology*, 147(6): 392–405.

Shi DD, Zhang S, Liang P, 2023. The current status of insecticide resistance in the cotton aphid, *Aphis gossypii* Glover and the management strategies. *Plant Protection*, 49(5): 270–278. [石丹丹, 张帅, 梁沛, 2023. 棉蚜抗药性现状及治理策略. 植物保护, 49(5): 270–278.]

Sun Y, Zhao HY, Shi CL, Li YQ, Liang XY, Huang Y, Han S, Song JJ, 2024. Effects of pesticide synergists on physical properties of 12 herbicides. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 40(29): 113–119. [孙妍, 赵红盈, 石春玲, 李玉泉, 梁新宇, 黄颖, 韩爽, 宋晋军, 2024. 农药增效剂对 12 种除草剂物理性质的影响. 中国农学通报, 40(29): 113–119.]

Yang SY, Zhang R, Zhang H, Wang HG, Wang HX, Chen YH,

2019. Synergistic effect of five spray adjuvants on spirodiclofen 240 g/L suspension concentrate and pyridaben 15% emulsifiable concentrate for the control of *Paracoccus marginatus*. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 21(4): 531–537. [杨石有, 张蕊, 张贺, 王红刚, 王洪星, 陈银华, 2019. 五种喷雾助剂对 240 g/L 螺螨酯悬浮剂和 15%哒螨灵乳油防治木瓜秀粉蚧的增效作用. 农药学学报, 21(4): 531–537.]

Zhang CH, Ma Y, Du FP, 2019. Research progress on the wetting and deposition behaviors of pesticide droplet on target surfaces with the addition of surfactants. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 21(5): 883–894. [张晨辉, 马悦, 杜凤沛, 2019. 表面活性剂调控农药药液对靶润湿沉积研究进展. 农药学学报, 21(5): 883–894.]

Zhang HH, Chen AQ, Shan TS, Dong WY, Shi XY, Gao XW, 2020. Cross-resistance and fitness cost analysis of resistance to thiamethoxam in melon and cotton aphid (*Aphis gossypii*, Hemiptera: Aphididae). *Journal of Economic Entomology*, 113(4): 1946–1954.

Zhang Q, Wang Y, Huang SS, Dong M, Feng GY, Wang YQ, Liu X, Liang QL, Lin YZ, Qi H, Wang SL, 2021. Effects of synergist on reduction and synergism of two common nicotine insecticides to control cotton aphids. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 58(8): 1435–1440. [张谦, 王燕, 黄山松, 董明, 冯国艺, 王永强, 刘旭, 梁青龙, 林永增, 祁虹, 王树林, 2021. 增效剂对常用烟碱类杀虫剂防治棉蚜的减量增效作用. 新疆农业科学, 58(8): 1435–1440.]

Zhang SW, Zeng QH, Yang H, Zhang C, Ding B, Yang HZ, Yang MF, 2023. Sublethal and transgenerational effects of broflanilide on *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae). *Crop Protection*, 174: 106421.

Zhang S, 2021. National monitoring results of pesticide resistance in agricultural pests in 2020 and scientific recommendations for rational pesticide use. *China Plant Protection*, 41(2): 71–78. [张帅, 2021. 2020 年全国农业有害生物抗药性监测结果及科学用药建议. 中国植保导刊, 41(2): 71–78.]

Zhang S, Qin M, Ren ZJ, Guo YW, Cheng SH, Li R, Gao YJ, Pan JC, Gao XW, 2023. Field efficacy of novel insecticides against pesticide-resistant *Aphis gossypii* in Xinjiang. *China Plant Protection*, 43(4): 72–75. [张帅, 秦萌, 任宗杰, 郭永旺, 程沈航, 李仁, 高永健, 潘建春, 高希武, 2023. 新型杀虫剂对新疆抗药性棉蚜的田间防效. 中国植保导刊, 43(4): 72–75.]

Zhong JY, Yan K, Wang X, Zhai XT, Jia BT, 2025. Effect of pyridalyl on *Plutella xylostella* and the effect of synergists. *China Plant Protection*, 45(4): 11–16. [钟婧尹, 闫坤, 王雪, 翟旭涛, 贾变桃, 2025. 三氟甲吡醚对小菜蛾的作用效应及添加增效剂的效果. 中国植保导刊, 45(4): 11–16.]

Zhong X, Yang YZ, Feng P, Ma QQ, Su Q, Wang XP, Zhang JM, 2022. Transcriptomic profiling of cotton leaves in response to cotton aphid damage. *Acta Physiologiae Plantarum*, 44(10): 98.

Zimmer CT, Panini M, Singh KS, Randall EL, Field LM, Roditakis E, Mazzoni E, Bass C, 2017. Use of the synergist piperonyl butoxide can slow the development of alpha‐cypermethrin resistance in the whitefly *Bemisia tabaci*. *Insect Molecular Biology*, 26(2): 152–163.